第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250239

潮汐区干湿循环下基于碳化与氯离子侵蚀的钢筋混凝土寿命预测

龚明子[1,2]，饶先鹏[1,2]，潘阿馨[1,2]，许　涛[1,2]

(1. 中交一公局厦门工程有限公司，福建 厦门 361021；2. 中交一公局绿建(厦门)科技有限公司，福建 厦门 361022)

摘　要：海洋工程中潮汐区的钢筋混凝土锈蚀劣化较为严重，因此，开展结构寿命预测研究对潮汐区干湿循环下的海工混凝土具有十分重要的意义。通过统计并拟合东南某沿海区域潮汐涨落的干湿循环数据，代入氯离子侵蚀计算模型，结合碳化对氯离子运输的影响，以混凝土中钢筋锈蚀的临界氯离子浓度为寿命预测的边界条件，建立基于碳化与氯离子侵蚀耦合作用的钢筋混凝土寿命预测概率模型，研究不同高度处钢筋混凝土的钢筋锈蚀概率，并与实际工程数据进行对比。结果表明：不同高度的潮汐变化规律属于典型的谐波类型。碳化减小低水胶比混凝土的氯离子扩散系数，但增大高水胶比的氯离子扩散系数。前期碳化对钢筋混凝土耐久性的影响较小，但当碳化穿透保护层后，混凝土耐久性迅速降低。随着高度增加，高水胶比混凝土的预测寿命先增大后减小，低水胶比混凝土的预测寿命先减小后增大再减小。对比实际工程与模型计算的数据结果可知，本模型的计算值与实际钢筋锈蚀概率较为接近，不同高度处的锈蚀概率相对风险系数也与实际工程统计结果较为吻合，模型具有较好的模拟效果。

关键词：潮汐区；钢筋混凝土；碳化；氯离子；干湿比；寿命预测
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0590–12
网络出版时间：2026–01–27

海洋工程中潮汐区的钢筋混凝土在干湿循环环境下锈蚀劣化严重，极大程度地威胁结构的承载能力和服役寿命[1]。因此，十分有必要选取科学的方法对潮汐区海工混凝土结构进行寿命预测。

目前，国内外对干湿循环下钢筋混凝土耐久性研究较为普遍，常见的研究方法是以钢筋表面氯离子浓度达到临界浓度为寿命预测的极限状态，通过调整或改进寿命预测方程进行耐久性设计。基于 Fick 第二定律与达西定律，大多学者将干湿交替作用进入混凝土内的氯离子通量分为扩散通量和对流通量 2 个部分，通过不同的水分扩散系数来模拟干湿变换时的水分对流运动[2–4]。Bao 等[5]对暴露站的试件进行 720 d 跟踪，发现潮汐区与浪溅区的干燥与湿润时间比不同，并建立引入干湿循环年时间比影响系数的寿命预测方程。氯离子侵入所引起的钢筋锈蚀是影响海工混凝土耐久性的最重要因素之一，也是研究潮汐区混凝土寿命预测的关键[6–8]。氯离子渗透到混凝土中是个复杂的过程，在物理化学互相作用下，氯离子侵蚀涉及多种传输机制。陈伟康等[9]研究多离子间电化学耦合效应和水分对流效应对氯离子传输的共同影响，指出干湿循环下单一离子传输会使对氯离子摄入量的预测偏低。Peng 等[10]提出多裂纹的氯离子预测扩散模型，并通过氯离子加速扩散试验发现干湿时间比和初始含水饱和度显著影响氯离子浓度分布，对流区深度与初始含水饱和度呈负相关。另一方面，海洋工程中碳化对氯离子侵蚀的影响也不可忽略。Li 等[11]考虑了干湿循环下 CO_2 与氯离子的“对流+扩散”形式，发现水分对流会加速氯离子传输，减缓 CO_2 传输。部分学者[12–14]认为碳化与氯离子扩散系数呈正比关系，刘清风团队的研究[15–17]也表明，碳化和氯离子侵蚀会加剧钢筋混凝土的锈蚀。另一部分学者给出了不同意见，王栋等[18]认为碳化对氯离子的影响近似于反比关系，Zhang 等[19]通过 1 a 的干湿循环腐蚀研究了碳化和氯离子侵蚀后的混凝土，发现碳化后总氯离子含量降低了 50%以上，王利成[20]在干湿循环、

收稿日期：2025–04–01。　修订日期：2025–05–26。
基金项目：福建省交通运输厅交通运输科技项目(202269)。
第一作者：龚明子(1986—)，女，硕士，正高级工程师。
通信作者：许　涛(1988—)，男，学士，高级工程师。

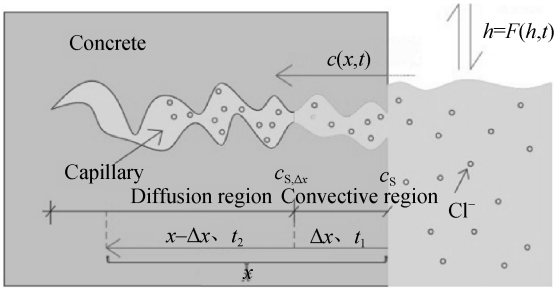
Received date: 2025–04–01.　**Revised date:** 2025–05–26.
First author: GONG Mingzi (1986–), female, Master, Senior Engineer.
E-mail: 573212643@qq.com
Correspondent author: XU Tao (1988–), male, Bachelor, Engineer.
E-mail: cccclvjian@foxmail.com

碳化和复合盐侵蚀共同作用下发现，氯离子结合能力受碳化和干湿循环的影响而减弱。由此可见，干湿循环下碳化对氯离子的影响可能存在促进与阻碍 2 个方面，且主要体现在氯离子扩散系数上。

基于此，本工作针对实际潮汐涨落进行统计分析，拟合出潮位方程，产生更贴切于实际海洋潮汐区的干湿比数据。开展碳化与氯离子侵蚀耦合试验，研究碳化对氯离子侵蚀的影响。最后，以混凝土中钢筋锈蚀的临界氯离子浓度为寿命预测的边界条件，将二者代入氯离子侵蚀模型，对比计算碳化对潮汐区钢筋混凝土寿命预测的影响。此外，计算潮汐区不同高度位置处钢筋混凝土的寿命预测，并与实际工程数据进行对比。

1　潮位方程

干湿变换环境下氯离子侵蚀主要涉及的运动类型分为 2 个区域：对流区和扩散区，如图 1 所示。氯离子传输模型包含 2 部分：设立潮位高度(h)与时间(t)相关的函数 $F(h, t)$来模拟潮水涨落的实际情况。使用氯离子侵蚀方程 $c(x, t)$来模拟氯离子侵蚀，x 是氯离子侵蚀深度，二者结合能使模型更加接近真实暴露环境下氯离子侵蚀行为。c_s 和 $c_{s,\Delta x}$ 分别代表混凝土表面氯离子浓度和侵蚀对流深度(Δx)处氯离子峰值浓度。



Note: x is length of Cl^- penetration; h is wave tip height; Δx is erosion convection depth; t_1 is the convection region time; t_2 is the diffusion region time; $F(h, t)$ is the tidal equation; $c(x, t)$ is the Cl^- erosion equation; c_s and $c_{s,\Delta x}$ represent the chloride ion concentration on the surface of concrete and the peak Cl^- concentration of Δx, respectively.

图 1　潮汐区混凝土 Cl^-传输

Fig. 1　Cl^- transport of concrete in tidal zone

潮汐区处于潮位变动区间，桥墩不同高度位置的干湿时间比例是不同的。模型以东南某沿海地区为例，根据国家海洋信息中心的统计数据，统计了东南沿海某港口近 3 年的所有潮位信息。潮汐变化规律表现为潮汐大约以 12 h 为周期进行涨落；大小高低潮交替出现；潮水起落幅度大约以 16 d 为周期进行循环。

根据统计结果发现，不同高度 h 处的潮汐变化规律属于典型的谐波类型，采用傅里叶变换的三角函数多项式对其拟合，得到潮汐变换方程如式(1)~式(3)所示。

$$F(h,t) = A(t) \times f(t) + 328.2 \tag{1}$$

$$A(t) = 0.852\sin^2(0.008\,75t) + 1.025 \tag{2}$$

$$f(t) = -139.02\cos(0.5054t + 14.21) + 30.017\sin(0.2525t + 9.5) \tag{3}$$

式中：$A(t)$为振幅，控制大周期的潮水涨落起伏；$f(t)$为潮位谐波方程。

对 $F(h, t)$进行二分法求解，得到潮汐区时段分布结果，如图 2 所示。值得注意的是，潮位方程为东南海域某监测站的潮汐数据拟合方程，其代表性为东南地区周边海域，及潮汐周期与东南海域相似的地区。

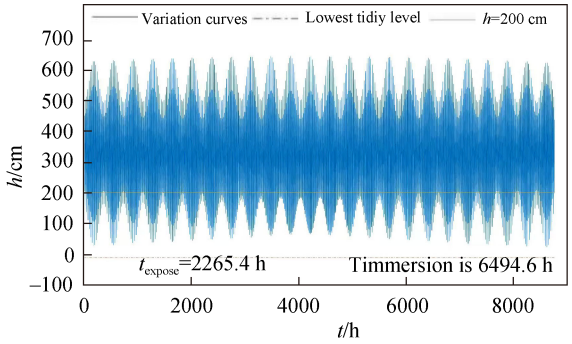


图 2　365 d 潮汐区时段分布

Fig. 2　365 d tidal zone distribution

2　碳化与氯离子侵蚀耦合作用试验

2.1　碳化与混凝土氯离子扩散系数

采用快速氯离子迁移系数(RCM)法测定不同碳化程度的混凝土试块的氯离子扩散系数(D)。混凝土配合比如表 1 所示，标准养护 28 d 后，将试件的 5 个面进行蜡封，1 个面用于碳化侵蚀。混凝土的碳化侵蚀参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB_T50082—2009)[21]进行，不同配合比试块分别碳化 0、3、7、14、21、28 d，每组配合比重复 2 次，取平均值。

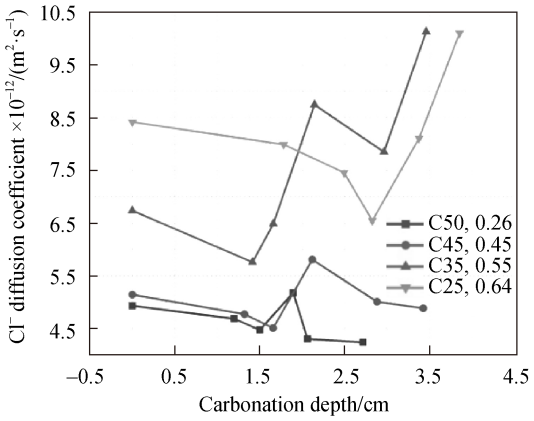
表 1　混凝土配合比

Table 1　Proportioning of concrete

f_{cu}	W/B	Cement/ (kg·m^{-3})	Water/ (kg·m^{-3})	Sand/ (kg·m^{-3})	Gravel/ (kg·m^{-3})
C50	0.26	610	160	700	1058
C45	0.43	355	160	700	1134
C35	0.55	290	160	683	1267
C25	0.64	284	182	700	1058

Note: f_{cu} is standard value of concrete cube compressive strength; W/B is water-binder ratio.

试验结果如图 3 所示，随着碳化深度(Δl)的增加，低水胶比混凝土 D 值先减小后增大再减小，高水胶比混凝土 D 值先减小后增大。早期 D 值下降与早期碳化生成$CaCO_3$体积膨胀会使表面的毛细孔道堵塞有关，而后随着碳化加深，混凝土内部毛细孔释放的结合氯离子增多，自由氯离子浓度加大，氯离子扩散能力增强，D 值增大。



C50, 0.26 is concrete with compressive strength of 50 MPa and water-binder ratio of 0.26, other naming methods are the same as C50, 0.26.

图 3 碳化深度与 Cl^-扩散系数

Fig. 3 Carbonation depth and Cl^- diffusion coefficient

与 Δl =0 cm 时相比，最终碳化会减小低水胶比混凝土 D 值，但会增大高水胶比混凝土 D 值，并且混凝土 D 值变化幅度随水胶比的降低而减小。这可能与碳化对不同水胶比混凝土中的孔隙影响有关，高水胶比下碳化加深后内部孔隙更容易出现堵塞，D 值再减小且最终小于初始状态；而高水胶比混凝土孔隙较大不易被堵塞，而前期碳化又破坏了混凝土对氯离子的吸附能力，同时碳化释放了结合氯离子，双重作用下高水胶比混凝土 D 值增大且最终大于初始状态。

进一步研究 Δl 与氯离子扩散系数变化率(ΔD)的关系，统计结果如表 2 所示。

表 2 碳化深度(Δl)与氯离子扩散系数变化率(ΔD)

Table 2 Carbonation depth (Δl) and Cl^- diffusion coefficient variation rate (ΔD)

Time/d	C50		C40		C35		C25	
	Δl/cm	ΔD/%	Δl/cm	ΔD/%	Δl/cm	ΔD/%	Δl/cm	ΔD/%
0	0	100.0	0	100.0	0	100.0	0	100.0
3	23.9	95.0	26.4	92.7	26.4	85.4	35.6	94.9
7	30.0	90.7	33.1	87.6	33.5	96.2	49.8	88.6
14	37.8	105.0	42.3	113.0	44.0	129.0	56.5	77.7
21	41.2	87.2	57.6	97.3	59.1	116.0	67.5	96.3
28	50.3	85.9	62.4	94.9	69.6	150.0	77.0	120.0

分别采用高水胶比 C35(水胶比 0.55)和低水胶比 C50(水胶比 0.26)配合比进行拟合计算，其中，C35 采用式(4)进行高斯拟合二次函数拟合[22]，C50 采用线性插值求出不同碳化程度下的 D 值。

$$D = D_0 \times \left[y_0 + A \times \exp(-0.5 \times (\Delta l - x_c)/w^2) \right] \quad (4)$$

式中：D_0 为未碳化时期的混凝土氯离子扩散系数；Δl 为碳化深度，cm；其余参数由拟合得出，分别为 y_0=137.462、x_c=16.722、w=16.500、A=–62.816。

2.2 碳化与钢筋锈蚀临界条件

碳化会改变钢筋周围混凝土的酸碱度，使钢筋对氯离子的耐受性不同。因此，可将碳化与钢筋锈蚀临界条件的关系转为不同 pH 环境下钢筋对不同氯离子浓度的耐受性。

划分 5 组不同 pH 值溶液，每组 3 根钢筋，接上导线，分别放入聚氯乙烯管模具，浇筑水泥净浆，成型后脱模，将其浸泡在不同 pH 值溶液中，每隔 48 h 向各溶液中分别滴入一定量的 NaCl 溶液，并定期通过锈蚀电流检测其是否生锈，不同 pH 值下钢筋的临界氯离子浓度(c_{cr})结果如表 3 所示。

表 3 不同 pH 值下钢筋的临界 Cl^-浓度(c_{cr})

Table 3 Critical Cl^- concentration (c_{cr}) of steel bar with different pH values

pH	Average/(mol·L^{-1})	Coefficient of variation/%	c_{cr}/(mol·L^{-1})
13.0	0.471	26.7	0.268
12.2	0.022	14.2	0.017
11.5	0.002	44.6	0.000
10.1	0.001	81.7	0.000
9.6	0.002	27.6	0.001

结合元成方等[23]提出的碳化与 pH 之间的关系和 JTG/T 3310—2019《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》[24]可知，当普通钢筋混凝土未碳化时，其 c_{cr} 与混凝土等级有关，取值如表 4 所示；当混凝土部分碳化时，c_{cr}=0.0015 mol/L；当混凝土已碳化时，c_{cr}=0.001 mol/L。

表 4 未碳化普通钢筋混凝土的 c_{cr}

Table 4 c_{cr} of uncarbonized ordinary reinforced concrete

W/B	f_{cu}	c_{cr}/(kg·m^{-3})
0.40	C40	1.4
0.45	C30	1.3
≥0.50	≤C25	1.2

3　干湿变换环境下氯离子侵蚀模型

3.1　氯离子侵蚀模型

氯离子侵蚀模型根据△x 划分为对流区与扩散区，对流区通过干湿交替作用进入混凝土内的氯离子通量包含扩散通量和对流通量 2 部分，其扩散模型如式(5)所示。

$$J_{Cl^-}=-\left(\underbrace{\frac{D\times\partial c}{\partial x}}_{\text{Diffusive flux}}+\underbrace{\frac{c\times D(\theta)\times\partial\theta}{\partial x}}_{\text{Convective flux}}\right) \tag{5}$$

式中：J_{Cl}-为氯离子通量，kg/m^2·s；c 为侵蚀深度 x 处的氯离子浓度；x 是侵蚀深度；θ 为混凝土含水率；$D(\theta)$是水分在混凝土中的扩散系数[4, 25]。

扩散区模型是基于 Fick 第二定律的运动方程，以 Δx 为起点，重新计算时间 t=t_2，并以此为初始条件和边界条件。

根据 Fick 第二定律、达西定律以及国内外学者提出的模型，总结得出氯离子浓度 c 与时间 t 相关的寿命预测模型[2–4, 25–26]，如式(6)所示。

$$c(x,t)=\begin{cases}\dfrac{\partial(c)}{\partial t}=\dfrac{\partial}{\partial x}\left[-D\times\dfrac{\partial c}{\partial x}-c\times D(\theta)\times\dfrac{\partial\theta}{\partial x}\right]\\ c=c_0+(c_{s,\Delta x}-c_0)\times\operatorname{erfc}\left(\dfrac{x-\Delta x}{2\sqrt{D\times t}}\right)\end{cases} \tag{6}$$

式中：c_0 是混凝土初始氯离子浓度；erfc(z)是误差函数。$D(\theta)$如式(7)所示，其与饱和度(s)有关，分为“干燥蒸发过程”和“浸水湿润过程”。

$$D(\theta)=\begin{cases}D_d^0\times\left\{\alpha+(1-\alpha)\times\left[1+\left(\dfrac{1-s}{1+s_c}\right)^N\right]\right\} & \text{Dry}\\ D_w^0\times\exp(ns) & \text{Wet}\end{cases} \tag{7}$$

式中：D_d^0 为干燥过程水分扩散系数，取 1.39 × 10^{-10} m^2/s [27]；α、s_c、N 为常数，取 α=0.05、s_c=0.792、N=6；D_w^0 为润湿过程水分扩散系数，取 4.053 × 10^{-11} m^2/s [4]；n 为常数，n=6。

值得注意的是，模型基于 Fick 第二定律及达西定律的两大基本定律构造而成，适用于符合 Fick 第二定律的近海大气环境、交替符合 Fick 第二定律及达西第二定律的干湿循环浸泡环境、符合达西扩散定律的海水浸泡环境下，碳化与氯离子耦合侵蚀作用下的混凝土耐久性预测。

3.2　边界条件

初始条件与边界条件：由干转湿过程和由湿转干过程分别设置如式(8)和式(9)所示，锈蚀临界条件按照 2.1 节中碳化分类下的 c_{cr} 进行取值。

$$\theta(x,0)=\theta_d;\quad \theta(0,t)=1;\quad \theta(x_m,t)=\theta_d \tag{8}$$

$$\theta(x,0)=1;\quad \theta(0,t)=\theta_d;\quad \theta(x_m,t)=1 \tag{9}$$

式中：θ_d 为混凝土内部含水率变化，x_m 为混凝土最深处。

3.3　模型验证

对流区模型偏微分方程采用 Crank-Nicolson 有限差分格式求解法[28]，求解氯离子传输方程之前，应先求解出水分传输方程，扩散区模型求解代入数值计算即可。

以李春秋等[3]与关鹏[8]的实验数据为例，定义高度为 H (H 为假定高度)，保护层厚度为 v、D_w 和 D_d 分别为湿润和干燥水分扩散系数，C_f 为混凝土抗压强度等级，S_d 为干燥过程中的湿度，假定侵蚀时间为 t，各参数取值如表 5 所示，计算结果如图 4 所示。由图4可见，模型预测值与实验结果相关性为97.8%，表明模型具有较好的准确性。

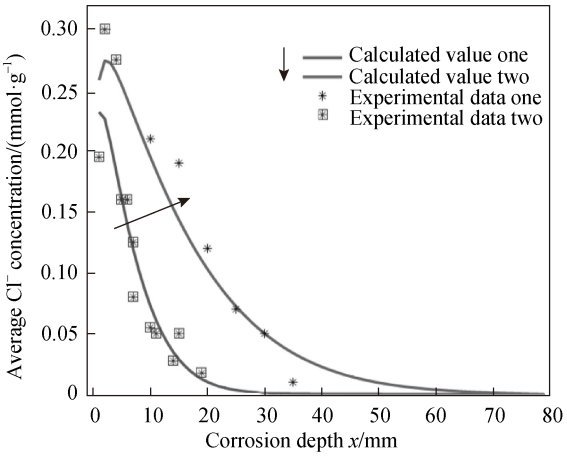


图 4　干–湿交替 4 个月后预测氯离子含量与实际数据

Fig. 4　Predicted content with actual data after 4 months dry–wet

表 5　预测模型算例

Table 5　Prediction model program parameter

Parameter	H/m	v/m	D_0/(m^2·s^{-1})	D_w/(m^2·s^{-1})	D_d/(m^2·s^{-1})	C_f/MPa	c_0/(kg·m^{-3})	S_d	c_s/(kg·m^{-3})	t/a
Parameter 1	5	0.08	4.0150×10^{-5}	0.0013	4.4000×10^{-3}	35	0	0.7	4.4375	0.3
Parameter 2	3	0.04	3.5005×10^{-5}	0.5156	2.4065×10^{-4}	25	0	0.8	3.9610	3.0

Note: H is the assumed height; v is the thickness of protective layer; D_w and D_d are the moisture diffusion coefficients of wetting and drying, respectively; C_f is the compressive strength grade of concrete; S_d is the humidity in the drying process; t is the erosion time.

4 寿命预测概率模型

干湿循环下氯离子侵蚀方程本质为浓度与时间的关系式，考虑工程中的不确定性因素，基于可靠度的耐久性寿命预测求解如图 5 所示。具体步骤为调研抽样式(6)的参数，结合 $F(h,t)$求解的干湿比数据，计算碳化对氯离子侵蚀的影响。以钢筋周围氯离子浓度达到临界值为极限状态，统计超出临界值的累计频率，并进行 Weibull 拟合，获得钢筋发生腐蚀的概率模型，求解出结构可靠度模型的值[29]。

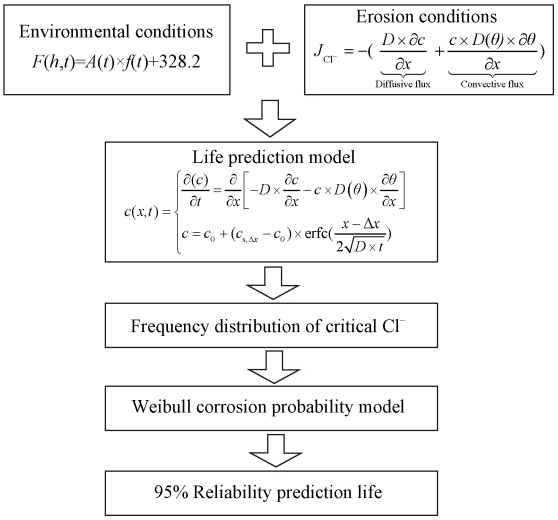


图 5 寿命预测分析流程图

Fig. 5 Life prediction analysis flow chart

4.1 参数分布与取值

大量研究表明[30–33]，D、c_s、c_0 以及 v 大多服从正态分布，在对正态分布进行抽样的同时，结合考虑实验结果碳化影响。

4.2 考虑碳化作用的寿命预测概率模型

由上述实验结果可知，碳化对高低水胶比混凝土的影响主要体现在 D 值上。因此，考虑碳化对高、低水胶比的影响，通过随机抽样计算出不同碳化程度下钢筋混凝土耐久性寿命预测的结果，拟合出 Weibull 概率模型。

1) 0%碳化

结合规范[24]、学者们[28, 34, 35]以及前述试验的参数结果，不考虑碳化作用的寿命预测参数取值如表 6 所示。

表 6 不考虑碳化作用的寿命预测参数取值

Table 6 The value of life prediction parameters without carbonation

Parameter	H/m	D_0/(m²·a⁻¹)	c_{cr}/(kg·m⁻³)	v/m	c_0/(kg·m⁻³)	c_s/(kg·m⁻³)	S_d	D_w/(m²·a⁻¹)	D_d/(m²·a⁻¹)	C_f/MPa
Value	5	High W/B: Normal (4.015×10^{-5}, 1.261×10^{-6}) Low W/B: Normal (2.940×10^{-5}, 1.261×10^{-6})	1.4	Normal (0.0800, 0.0075)	Normal (0.0010, 0.0001)	Normal (4.4375, 0.0060)	0.7	0.0013	0.0044	35

Note: normal (μ, σ) is normal distribution.

不考虑碳化的混凝土寿命预测结果如图 6 所示。由图 6a 可以看得出，高水胶比下寿命预测结果多集中在 30~40 a，预计寿命的频数与频率分布近似正态分布。统计累计锈蚀概率，再使用最小二乘法拟合 Weibull 参数，最终拟合结果如图 6b 所示。从图 6b 可以看出，Weibull 概率模型与预测结果有较好的拟合度，因此，采用 Weibull 函数拟合钢混凝土的累计锈蚀概率是可行的。由图 6b 还可以看出，预期寿命分布的 95%置信线为 21.9 a，即在服役 21.9 a 之前，混凝土具有 95%的可靠度不会发生钢筋锈蚀。

同样进行低水胶比混凝土预测寿命频数和拟合分析，对比高低水胶比的锈蚀概率图和拟合结果可以明显看出，低水胶比混凝土的预测寿命要比高水胶比的更长，这表明混凝土降低水胶比有利于抵抗氯离子侵蚀，增加混凝土的预测寿命。

2) 50%碳化

考虑碳化对 D 和 c_{cr} 的影响，分别进行参数取值，其余参数不变。假设 Δl 为保护层的一半，即 50%碳化，计算可得 C35 高水胶比混凝土 D=5.189×10⁻⁵ m²/s。

由于碳化还没有达到钢筋部分，因此 c_{cr} 仍取 1.4 kg/m³。C50 低水胶比混凝土考虑碳化的 D 值时，根据实验数据进行线性插值，求得低水胶比混凝土 D=2.527×10⁻⁵ m²/s。

最终计算结果如图 7 所示，从图 7a 中可以明显看出高水胶比混凝土考虑保护层 50%碳化后，预计使用寿命大多数处于 25~30 a，与图 7b 相比，有较大缩减，其 95%可靠度的预测寿命也缩减至 0~19 年，可见碳化对预计寿命的影响较大。

而从图 7d 中可以看出，与 0%碳化相比，50%碳化后低水胶比的预测寿命增大，这是因为碳化会使低水胶比混凝土的氯离子扩散系数降低，阻碍氯离子传输，减小混凝土的锈蚀破坏，进一步增加其预测寿命。

3) 100%碳化

同理可得，100%碳化下的高水胶比 C35 混凝土

的 D 值为 5.519×10^{-5} m²/s，C50 低水胶的 D 值为 2.117×10^{-5} m²/s。

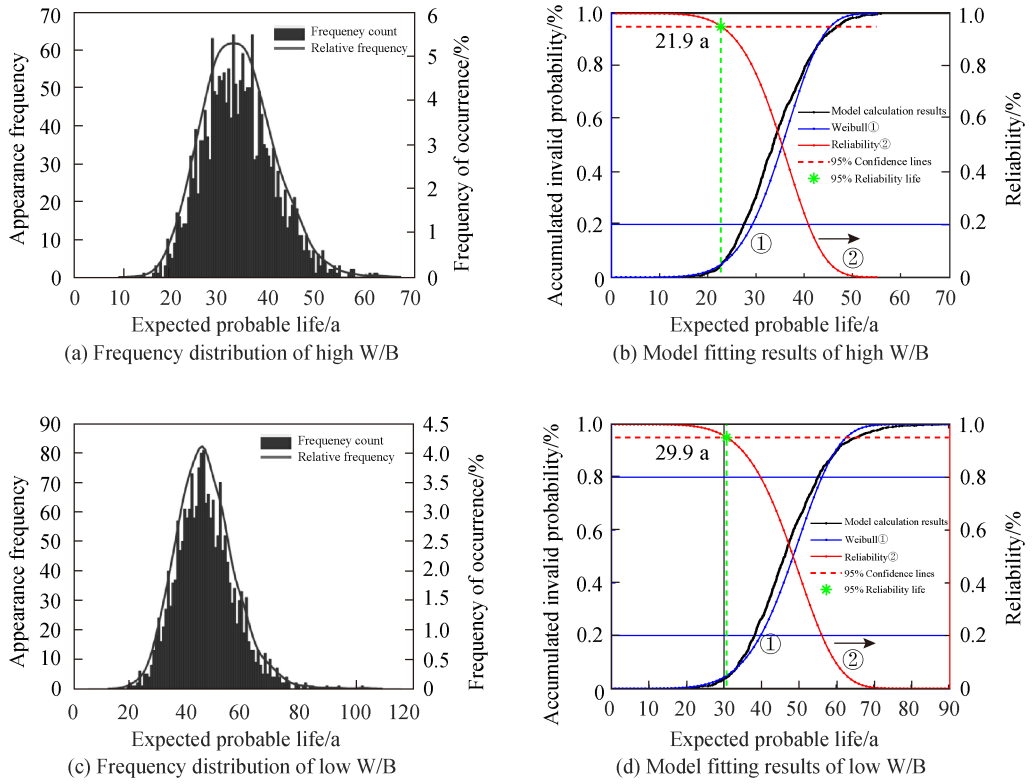


图 6　不考虑碳化的寿命预测结果(抽样 2000 组)

Fig. 6　Life prediction results without carbonation (2000 samples)

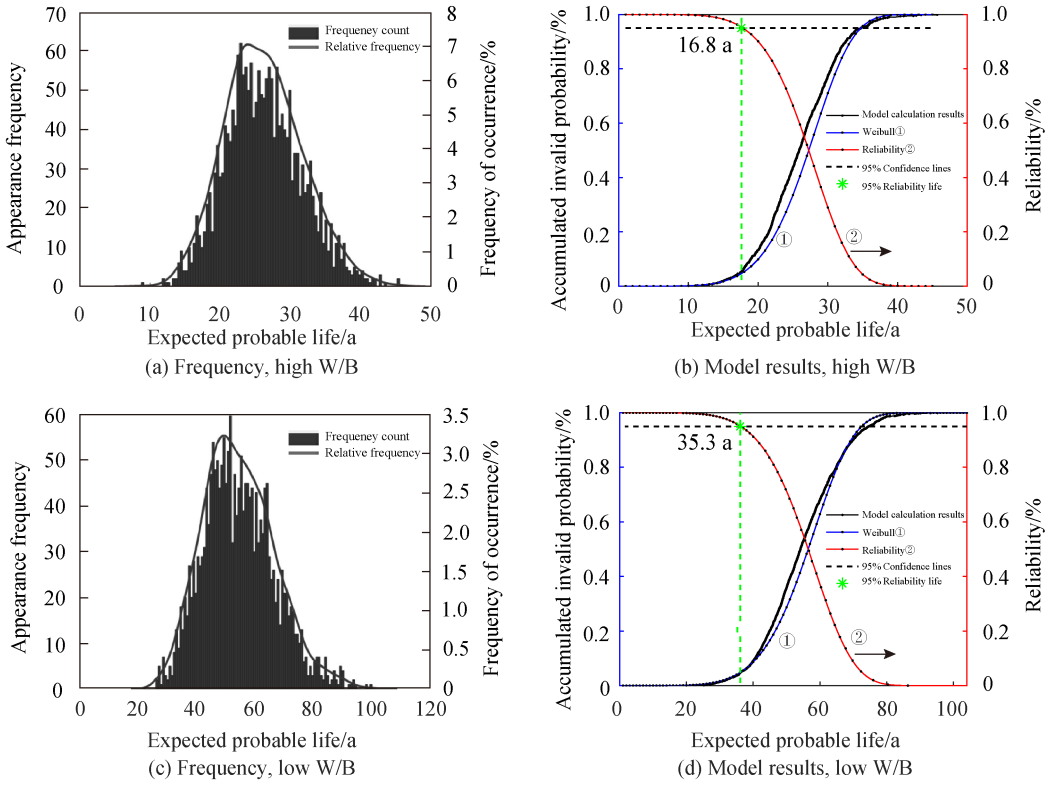


图 7　考虑保护层碳化 50%作用的寿命预测结果(抽样 2000 组)

Fig. 7　Life prediction results considering 50% carbonation of protective layer (2000 samples)

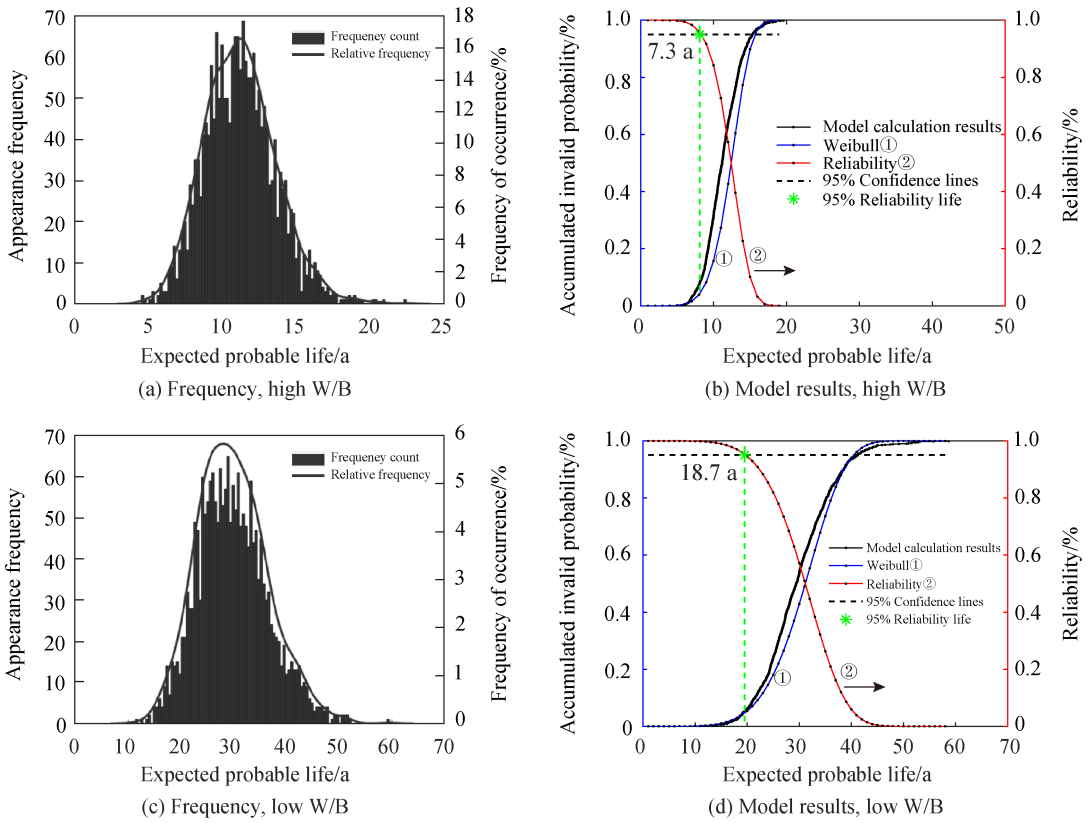


图 8 考虑保护层完全碳化作用的寿命预测结果(抽样 2000 组)

Fig. 8 Life prediction results considering complete carbonation of protective layer (2000 samples)

对比图 6b、图 7b 与图 8b 可以看出，碳化对混凝土的寿命预测有明显影响。随着碳化的增加，混凝土寿命预测逐渐变短，95%可靠度下混凝土预测寿命分别是 22、17、7 a。碳化还未超过保护层厚度时，碳化只影响 D，对混凝土的影响较小。而当碳化程度达到 100%时，碳化超出 v，预测寿命显著下降，这是由于碳化改变了钢筋周围混凝土的 pH 值环境，使得混凝土内部碱性下降，导致钢筋的钝化膜极易发生破坏，此时极低的氯离子浓度即可使钢筋锈蚀。

从图 8d 中还可以看出，100%碳化时低水胶比混凝土的预测寿命也大幅降低，但仍要远远高于高水胶比混凝土的预测寿命，且高出将近 3 倍。这是因为低水胶比混凝土内部孔隙极小，混凝土基体内部较为密实，碳化对其作用以阻碍氯离子扩散为主，100%碳化虽会降低钢筋周围的碱度，但混凝土内部氯离子含量远小于高水胶比混凝土。

4.3 不同高度位置的寿命预测概率模型

寿命预测模型的另一特点为可求解不同高度位置处的寿命预测结果，通过设定 H 为 1~6 m 研究不同高度位置对于寿命的影响。不同高度位置处混凝土预测寿命的影响因素主要为干湿时间比和碳化程度。统计不同高度位置处的干湿比，等效为不同碳化时间和碳化程度，以此研究不同高度位置处的预测寿命。图 9 为不同 H 处的干湿时间比，随着 H 的增加，相对干湿比近似呈指数增加，H=6 m 时干湿比是 H=1 m 时的 864 倍，即 H=6 m 处的碳化时间是 H=1 m 的 864 倍。大量研究结果可知[18, 28, 29]，碳化深度 Δl 与碳化时间 t 大致符合式(10)的规律，碳化深度比如表 7 所示。

$$\Delta l = q\sqrt{t} \tag{10}$$

式中：q 为常数，与混凝土性质有关。

表 7 不同高度位置 H 处的碳化深度比

Table 7 Ratio of carbonation depth ratio at different H

H/m	Carbonation depth ratio
1	1.000
2	2.449
3	4.000
4	5.657
5	10.580
6	29.394

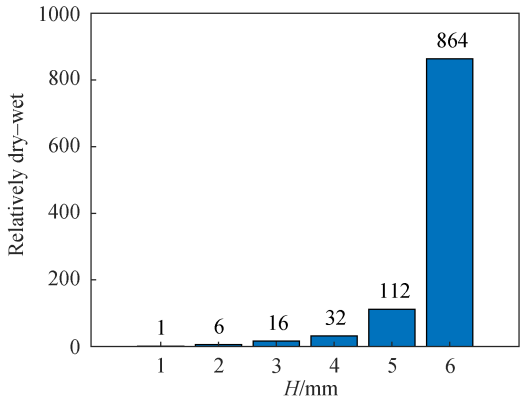
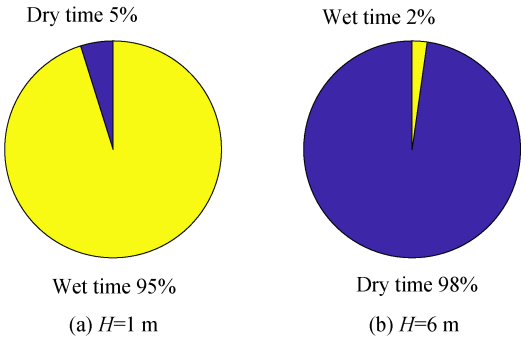


图 9　不同高度 H 处的干–湿时间比(以 H=1 m 基准)

Fig. 9　Dry–wet time ratio at different H (base on H=1 m)



(a) H=1 m　　(b) H=6 m

图 10　不同高度 H 处的干–湿比示意图

Fig. 10　Dry–wet ratio at different H

假设 H=1 m 处的碳化深度为保护层的 5%，混凝土强度为 C35，受碳化影响的氯离子扩散系数和 c_{cr} 如表 8 所示，其余参数参考表 6，计算不同 H 处的混凝土寿命预测结果如表 9 所示。

表 8　不同高度位置 H 处的 D 与 c_{cr} 参数取值

Table 8　D and c_{cr} with different H

H/m	Suppose carbonation ratio/%	D×10^{-5} (High W/B)/(m^2·s^{-1})	D×10^{-5} (Low W/B)/(m^2·s^{-1})	c_{cr}/(kg·m^{-3})
1	5.000	3.560	2.910	1.400
2	12.245	3.088	2.866	1.400
3	20.000	3.046	2.824	1.400
4	28.285	3.546	2.690	1.400
5	52.900	5.291	2.499	1.400
6	100.000	5.519	2.117	0.035

由表 8 和表 9 可知，随着 H 增大，高水胶比 D 值先减小后增大，低水胶比 D 值则不断减小，干湿比表现为先增大后减小。当 H 较小时，预测寿命变化差异不大；当 H 较大时，预测寿命明显减小。这表明混凝土不同高度位置的预测寿命同时受干湿比和氯离子扩散系数的影响。

表 9　不同高度位置 H 处寿命预测计算结果

Table 9　Calculation results of life prediction at different H

H/m	Dry–wet ratio	95% Reliability prediction life	
		High W/B	Low W/B
1	5/95	30.2	36.9
2	26/74	32.2	35.5
3	45/55	31.3	33.6
4	62/38	26.0	33.9
5	85/15	16.5	34.5
6	2/98	7.3	19.1

对比高低水胶比发现，两者的 95%可靠度预计寿命存在较大差异，高水胶比混凝土随着 H 的增加，预测寿命先增大后减小；而低水胶比混凝土的预测寿命则是先减小后增大再减小。二者在潮汐区中部 2~5 m 范围区内的耐久性趋势正好相反，这是由于接触空气的碳化对二者的作用效果相反，随着 H 的增大，混凝土接触空气时间越长、碳化程度越大，促进高水胶混凝土中氯离子运输，但阻碍低水胶比混凝土的氯离子运输，造成完全相反的趋势。而 100%碳化后，钢筋周围碱度降低，极大地降低了钢筋对氯离子的耐受性，此时高低水胶比混凝土的耐久性均快速降低。

5　基于大桥模型的对比分析

为进一步验证模型的准确性，与实际工程东南沿海某大桥的数据进行对比分析。根据大桥检测报告[35]可知，大桥服役 30 a，桥墩混凝土强度为 C30，不同高度 H 的氯离子含量可换算为氯离子浓度，c_s 取 10.8 kg/m^3，c_{cr} 取 1.3 kg/m^3。参考规范[23]且考虑碳化的影响，大桥不同高度处 D 如表 10 所示。

表 10　大桥桥墩不同高度位置 H 处的 D 值

Table 10　D value at different H of the bridge pier

H/m	Carbonation ratio /%	D×10^{-5}/(m^2·s^{-1})
1	0.21	1.31
2	0.51	1.30
3	0.83	1.29
4	1.17	1.28
5	2.19	1.25
6	6.09	1.14

综合考虑碳化情况与混凝土强度等级，发现碳化程度远未达到钢筋处，桥墩钢筋锈蚀概率预测参数取值如表 11 所示。

表 11 大桥桥墩钢筋锈蚀概率预测参数取值

Table 11 Prediction parameter value of reinforcement corrosion probability of bridge pier

Parameter	H/m	D_0/(m^2·a^{-1})	c_{cr}/(kg·m^{-3})	v/m	c_0/(kg·m^{-3})	c_s/(kg·m^{-3})	C_f/MPa
Value	1–6	Normal (D×10^{-5} 1.2614×10^{-6})	1.3	Normal (0.0632, 0.0118)	Normal (0.001, 0.0001)	Normal (10.8, 0.006)	30

图 11 为大桥潮汐区桥墩不同高度位置处的预测寿命计算结果，大桥在服役 30 a 的情况下，其锈蚀率为 13.872%~17.386%，平均锈蚀概率约为 15.5%。

统计模型计算值和桥墩实际值的 30 a 锈蚀率，如图 12 所示，随着 H 变大，钢筋锈蚀相对风险系数先增大后减小，大桥模型计算值与实际值高度发展规律较为一致，且计算值表现出较高冗余度，这表明模型在不同高度处耐久性的计算有较好的模拟效果。

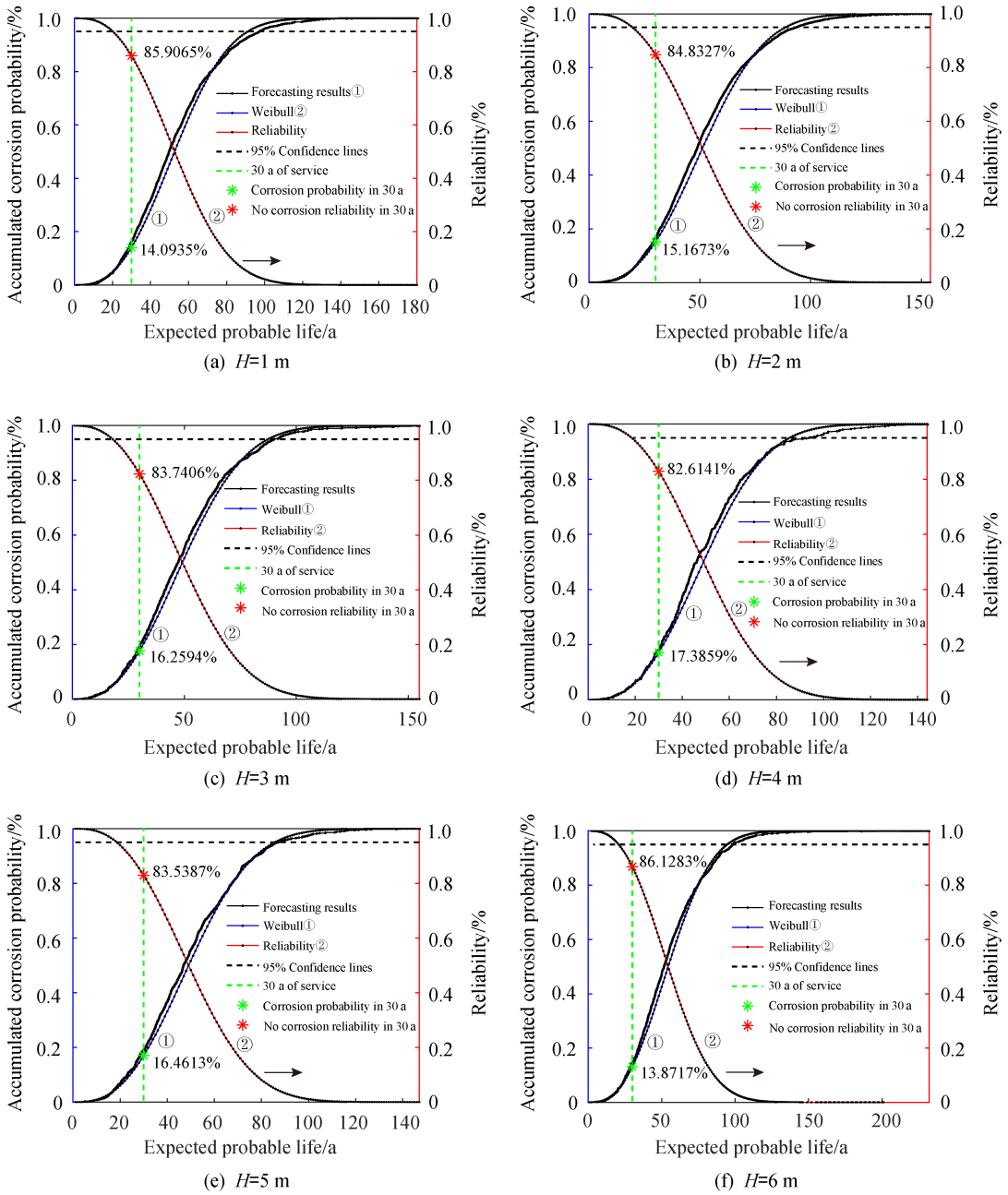


图 11 大桥潮汐区桥墩预测寿命计算结果

Fig. 11 Prediction life calculation results of bridge pier in tidal zone

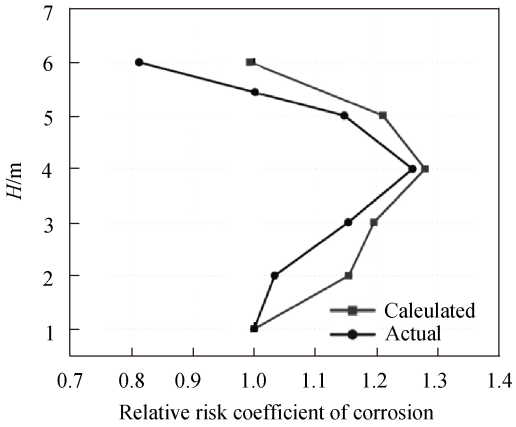


图 12　大桥不同高度位置 H 处钢筋锈蚀相对风险系数

Fig. 12　Relative risk coefficient of steel bar corrosion at different height positions H of the bridge

6　结论

现有钢筋混凝土寿命研究中干湿比常以假定值或平均值表示，与实际海工混凝土所受的动态潮汐变化所不符。本工作基于东南沿海港口的实际潮汐数据拟合潮位方程，通过试验研究碳化对氯离子扩散系数的影响，及不同 pH 环境下碳化与钢筋锈蚀临界条件的关系，以钢筋发生锈蚀作为寿命预测的极限状态，建立钢筋混凝土的寿命预测概率模型，并与对比东南沿海某跨海大桥实际工程数据。主要结论为：

1) 不同高度的潮汐变化规律属于典型的谐波类型。拟合的潮位方程求解出更贴近实际的干湿比数据。

2) 碳化会减小低水胶比混凝土的氯离子扩散系数，但会增大高水胶比混凝土的氯离子扩散系数。前期碳化对混凝土耐久性影响较小，当碳化穿透保护层后钢筋混凝土耐久性快速降低。

3) 随着高度增加，高水胶比混凝土的预测寿命先增大后减小，低水胶比混凝土的预测寿命先减小后增大再减小。

4) 相比于东南沿海某跨海大桥实际工程数据，预测模型模拟的潮汐区钢筋锈蚀概率与规律的预测具有较好的准确性，大桥潮汐区桥墩钢筋发生锈蚀的概率随着高度增加先增大后减小。

参考文献:

[1] KOSALLA M, RAUPACH M. Diagnosis of concrete structures: The influence of sampling parameters on the accuracy of chloride profiles[J]. Mater Struct, 2018, 51(3): 75.

[2] 金伟良, 张奕, 卢振勇. 非饱和状态下氯离子在混凝土中的渗透机理及计算模型[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(10): 1362–1369.
JIN Weiliang, ZHANG Yi, LU Zhenyong. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(10): 1362–1369.

[3] 李春秋, 李克非. 干湿交替下表层混凝土中氯离子传输: 原理、试验和模拟[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 581–589.
LI Chunqiu, LI Kefei. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(4): 581–589.

[4] 关博文, 杨涛, 於德美, 等. 干湿循环作用下钢筋混凝土氯离子侵蚀与寿命预测[J]. 材料导报, 2016, 30(20): 152–157.
GUAN Bowen, YANG Tao, YU Demei, et al. Mater Rev, 2016, 30(20): 152–157.

[5] BAO J W, WEI J N, ZHANG P, et al. Experimental and theoretical investigation of chloride ingress into concrete exposed to real marine environment[J]. Cem Concr Compos, 2022, 130: 104511.

[6] PENG J X, CHENG X K, YANG Y M, et al. Chloride transport in concrete subjected to multiple cracks under drying-wetting cycles[J]. Constr Build Mater, 2025, 470: 140559.

[7] YANG Y M, CHEN H, PENG J X, et al. Machine learning-based probabilistic prediction model for chloride concentration in the interfacial zone of precast and cast-in-place concrete structures[J]. Structures, 2025, 72: 108224.

[8] 关鹏. 干湿循环下混凝土氯离子传输模型研究[J]. 混凝土, 2012(11): 7–11.
GUAN Peng. Concrete, 2012(11): 7–11.

[9] 陈伟康, 刘清风. 干湿交替下混凝土中水分和多离子耦合传输的数值研究[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 622–632.
CHEN Weikang, LIU Qingfeng. J Hydraul Eng, 2021, 52(5): 622–632.

[10] PENG J X, XIAO J Y, YANG Y M, et al. Long-term experimental study and prediction of the mechanical performance on corroded prestressing steel strands subjected to marine salt spray environment[J]. Constr Build Mater, 2024, 425: 136069.

[11] LI D W, LI L Y, LI P, et al. Modelling of convection, diffusion and binding of chlorides in concrete during wetting-drying cycles[J]. Mar Struct, 2022, 84: 103240.

[12] 柳俊哲, 孙武, 贺智敏, 等. 碳化对含氯盐混凝土钢筋腐蚀特征的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 281–286.
LIU Junzhe, SUN Wu, HE Zhimin, et al. J Build Mater, 2015, 18(2): 281–286.

[13] ZHENG Y J, RUSSELL M, DAVIS G, et al. Influence of carbonation on the bound chloride concentration in different cementitious systems[J]. Constr Build Mater, 2021, 302: 124171.

[14] YUAN C F, NIU D T, LUO D M. Effect of carbonation on chloride diffusion in fly ash concrete[J]. Disaster Adv, 2012, 5(4): 433–436.

[15] TONG L Y, LIU Q F, XU X, et al. Effect of carbonation on transport properties of cementitious materials under different environmental conditions: A pore-scale modelling[J]. J Clean Prod, 2025, 490: 144669.

[16] SHEN X H, JIANG W Q, HOU D S, et al. Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103402.

[17] SHEN X H, LIU Q F, HU Z, et al. Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study[J]. Ocean Eng, 2019, 189: 106350.

[18] 王栋, 孙家瑛, 房信峰. 碳化作用对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 212–214.
WANG Dong, SUN Jiaying, FANG Xinfeng. Sichuan Build Sci, 2014, 40(3): 212–214.

[19] ZHANG D, SHAO Y X. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete[J]. Constr Build

Mater, 2016, 123: 516–526.
[20] 王利成. 干湿循环–碳化–复合盐侵蚀共同作用下水泥基材料的物质传输和劣化机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
WANG Licheng. Study on material transport and deterioration mechanisms of cement-based materials subject to combined action of cyclic wetting-drying-carbonation combined salt attack[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
[21] GB/T 50082-2009. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 61-64.
[22] 陈宣东, 陈平, 梁秋群, 等. 钢筋表面氯离子浓度预测实用模型及数值研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1778–1783.
CHEN Xuandong, CHEN Ping, LIANG Qiuqun, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2020, 39(6): 1778–1783.
[23] 元成方, 牛荻涛, 段付珍, 等. 碳化过程中混凝土模拟孔溶液 pH 值变化规律研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(5): 1126–1130.
YUAN Chengfang, NIU Ditao, DUAN Fuzhen, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2011, 30(5): 1126–1130.
[24] 苏交科集团股份有限公司, 东南大学等. JTG/T 3310—2019 公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
[25] 李镜培, 李鹤. 海洋环境下混凝土方桩使用寿命预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 1371–1376.
LI Jingpei, LI He. J Tongji Univ Nat Sci, 2016, 44(9): 1371–1376.
[26] WANG Y Z, GUO S, YAN B C, et al. Experimental and analytical investigation on chloride ions transport in concrete considering the effect of dry-exposure ratio under diurnal tidal environment[J]. Constr Build Mater, 2022, 328: 127138.
[27] JANSSEN H, BLOCKEN B, CARMELIET J. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation[J]. Int J Heat Mass Transf, 2007, 50(5–6): 1128–1140.
[28] 孙志忠. 偏微分方程的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 194-203.
[29] 元成方, 牛荻涛. 基于可靠度理论的海工混凝土结构寿命预测[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(4): 73–79.
YUAN Chengfang, NIU Ditao. J Wuhan Univ Technol, 2013, 35(4): 73–79.
[30] 刘志勇. 基于环境的海工混凝土耐久性试验与寿命预测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
LIU Zhiyong. Study on methods of accelerated testing of marine concrete durability based on simulating environment and service life prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
[31] 陈胜平. 非饱和混凝土氯离子运输机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
CHEN Shengping. Mechanism of chloride ions transportation in unsaturated concrete[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
[32] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C K, et al. Critical chloride content in reinforced concrete: A review[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(12): 1122–1138.
[33] 贺文龙. 跨海大桥混凝土裂缝养护和寿命预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
HE Wenlong. Concrete cracks of bridge in the conservation and life prediction[D]. Xi'an: Changan University, 2012.
[34] 王胜年, 苏权科, 李克非, 等. 港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
[35] 中交公路规划设计院. 厦门市厦门大桥改造加固前特殊检查及荷载试验报告[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司检测中心, 2018: 28.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Special Inspection and Load Test Report of Xiamen Bridge before Reconstruction and Reinforcement[R]. Beijing: Inspection Center of CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2018: 28.

Coupled Carbonation–Chloride Effects on Reinforced Concrete: Service Life Predicting Under Marine Tidal Zone Cyclic Drying–Wetting Conditions

GONG Mingzi[1,2], *RAO Xianpeng*[1,2], *PAN Axin*[1,2], *XU Tao*[1,2]
(1. China First Highway Xiamen Engineering Co., Ltd., Xiamen 361021, Fujian, China; 2. China First Highway Engineering Xiamen Green Architecture Technology Co., Ltd., Xiamen 361022, Fujian, China)

Extended Abstract

Introduction In marine engineering, reinforced concrete corrosion and deterioration in tidal zones are severe. It is thus important for marine concrete subjected to cyclic wet-dry conditions in tidal environments to investigate structural service life prediction. Corrosion of steel bar caused by chloride ion intrusion is one of the most important factors affecting the durability of marine concrete, and it is also a key to investigating the life prediction of concrete in tidal zone, while the influence of carbonation on chloride ion erosion cannot be ignored. In this study, the data were incorporated into a chloride ion ingress model considering carbonation effects on ion transport *via* statistically analyzing and fitting tidal cycle data from a coastal area in the Southeastern China. A probabilistic service life prediction model was established based on the coupled carbonation-chloride interaction, using critical chloride concentration for steel bar corrosion as the boundary condition. The corrosion probabilities of reinforced concrete at different elevation levels were investigated and compared with actual engineering data.

Methods According to the statistical data, China, the tidal level information of the southeast coast was counted, and the tidal equation was obtained. The chloride diffusion coefficient D of concrete with different carbonation degrees was determined by RCM. According to the standard GB T50082—2009, China, the carbonation depth Δl and the change rate of chloride ion diffusion coefficient ΔD were calculated at 0, 3, 7, 14, 21 d and 28 d, respectively. To investigate the critical conditions of carbonization and steel corrosion, 5 groups of solutions with different pH values were prepared, the specimens after demoulding were immersed in the solution, a certain amount of NaCl was dripped into each solution for every 48 h, and the rust was detected regularly.

Based on Fick 's second diffusion law, Darcy 's convection law and the model proposed, a life prediction model of chloride ion concentration C related to time t was obtained. The results of durability life prediction of reinforced concrete under different carbonization degrees were calculated by random sampling, and the Weibull probability model was fitted to analyze the influence of different carbonization rates at high and low water–binder ratios. The dry–wet ratio at different height positions was counted after setting H=[1,6], the influence of different height positions on life was analyzed. According to the test report of a bridge in the southeast coast, the chloride ion diffusion coefficient D at different heights of the bridge was calculated, and the 30 a corrosion rate of the calculated value of the model and the actual value of the pier was counted, and the height development law and redundancy of the calculated value and the actual value of the bridge model were analyzed.

Results and discussion The law of tidal change at different heights belongs to the typical harmonic. The fitted tidal level equation solves the dry–wet ratio data closer to the reality. The low water-binder ratio concrete' D firstly decreases, and then increases and decreases, and high water-binder ratio concrete' D firstly decreases and then increases with the increase of carbonization depth. Compared with the carbonation depth of 0 cm, the final carbonation can reduce low water-binder ratio concrete' D, but increase high water-binder ratio concrete' D.

The life prediction results of high water-binder ratio are mostly concentrated in 30–40 a with 0% carbonization. The frequency and distribution of life expectancy are approximately a normal distribution, and the 95% life expectancy distribution is 21.9 a. The predicted service life of low water-binder ratio concrete is longer than that of high water-binder ratio, the predicted service life of high water-binder ratio concrete is mostly between [25, 30], and its 95% predicted service life is reduced to [0, 19] with 50% carbonization. Compared with 0% carbonization, the predicted life of low water-binder ratio with 50% carbonization increases. The life prediction of concrete is gradually shorter, and the predicted life with 95% reliability is 22, 17 a and 7 a, respectively, as carbonization increases. However, the 100% carbonization exceeds the thickness of the protective layer, and the predicted life decreases significantly. The predicted life of low water-binder ratio concrete with 100% carbonization is greatly reduced, but it is nearly 3 times higher than that of high water-binder ratio concrete.

The high water-binder ratio' D firstly decreases and then increases, the low water–binder ratio' D decreases continuously, and the dry–wet ratio firstly increases and then decreases, the predicted life of high water–binder ratio concrete firstly increases and then decreases, and the predicted life of low water–binder ratio concrete firstly decreases, and then increases and decreases as the height position H increases. The durability trend of the two in the range of 2–5 m in the middle of the tidal zone is opposite.

Compared with the data of a bridge in the southeastern coast for the carbonization and concrete strength grade, the carbonization degree is far from the steel bar. In the case of 30 a service, the corrosion rate is 13.872%–17.386%, and the average corrosion probability is 15.5%. The relative risk coefficient of steel corrosion firstly increases and then decreases with H. The calculated value of the bridge model is consistent with the actual value, and the calculated value shows a high redundancy.

Conclusions The tidal variation patterns at different elevations belonged to typical harmonic wave types. Carbonation reduced chloride diffusion coefficients in low water-binder ratio concrete but increased it in high water-binder ratio concrete. The initial carbonation had a minimal impact on the reinforced concrete durability, but the concrete durability decreased rapidly when carbonation penetrated the protective layer. The service life of high water–binder ratio concrete showed an initial increase and a subsequent decrease, while low water-binder ratio concrete exhibited a sequential decrease–increase–decrease pattern as the height increased. A comparison of actual engineering data and model calculation results indicated that the computed values of the model could be close to actual steel corrosion probabilities, and the relative risk coefficients of corrosion probabilities at different heights were consistent with statistical results from engineering practice, demonstrating a reasonable simulation effectiveness of the model.

Keywords tidal area; steel reinforced concrete; carbonation; chloride ion; dry–wet ratio; life prediction